مطالعه خصوصیات بیومکانیکی مؤثر در کاهش ضایعات انار با استفاده از مدل‌های استراحت تنش ماکسول و پلیج

علی اکبر حسین پور[۱]، حسن عاقل[۲]، محمد حسین سعیدی راد[۳]، حسن صدرنیا[٤]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲ و ٤- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۳- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واحد طرق خراسان رضوی

چکیده

مطالعه و بررسی خصوصیات بیومکانیکی میوه‌ها می‌تواند در کاهش ضایعاتی که اغلب در زمان برداشت و پس از برداشت میوه و هنگام حمل و نقل به وجود می‌آید مؤثر باشد. در این مطالعه خصوصیات بیومکانیکی سه واریته میوه انار (اردستانی، شیشه کپ و ملس) که جزء واریته‌های مورد کشت در خراسان رضوی می‌باشند در سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات بیومکانیکی مانند مقاومت فشاری میوه، مقاومت نفوذ پوست میوه و رفتار میوه تحت تنش فشاری اعمال به آن در یک تغییر شکل ثابت و در یک مدت زمان ثابت (آزمون استراحت تنش) مورد بررسی قرار گرفت سپس با برازش مدل‌های ویسکوالاستیک رایج ماکسول و پلیج بر داده‌های به دست آمده از آزمون استراحت تنش و تعیین ضرایب مدل‌ها واریته و اندازه‌ای که نسبت به سایر واریته‌ها و اندازه‌ها دارای کم‌ترین آسیب مکانیکی و ضایعات در فرآیندهای برداشت و پس از برداشت میوه می‌باشد شناسایی شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که واریته شیشه کپ نسبت به سایر واریته‌ها دارای آسیب‌های مکانیکی و به طبع آن دارای ضایعات برداشت و پس از برداشت کمتری می‌باشد.

کلید واژه: ضایعات برداشت و پس از برداشت انار، خصوصیات بیومکانیکی، استراحت تنش، مدل ماکسول، مدل پلیج

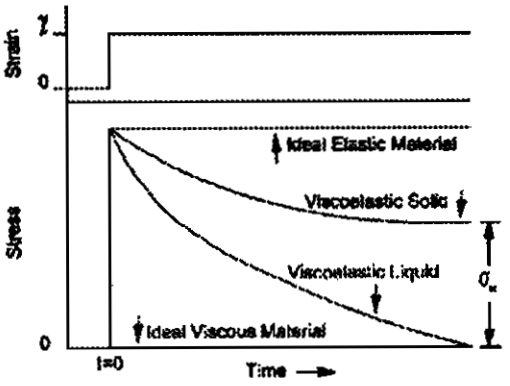
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد،۰۹۱۵۸۰۲۲۷۶۵، al.hosseinpour63@gmail.com
۲ - استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد،۰۵۱۱۸۷۸۸٤۹٤، hhaghel@ferdowsi.um.ac.ir
۳- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واحد طرق خراسان رضوی،۰۵۱۱۳۸۲۲۳۰۱، saiedirad@yahoo.com
٤- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد،۰۵۱۱۸۷۹٦۸٤۳، hassan.sadrnia@um.ac.ir

۱) مقدمه

میزانی از ضایعات پس از برداشت میوه انار بر اثر نیروهای مکانیکی وارد بر آن در هنگام برداشت، حمل و نقل و انبارداری به وجود می‌آید. این نیروها (استاتیکی یا دینامیکی) باعث ایجاد ضایعات قابل توجهی به وسیله کاهش در کیفیت محصول و افزایش حساسیت آن به تلف شدن در زمان انبارداری می‌شود (۱). مطالعه و بررسی خواص بیومکانیکی مربوط به میوه انار می‌تواند در کاهش و کنترل ضایعات پس از برداشت آن مؤثر باشد و علاوه بر افزایش کیفیت این محصول استراتژیک باعث افزایش کمی صادرات این محصول نیز خواهد داشت.

یکی از خواص جالب توجه محصولات کشاورزی این است که رابطه تنش- تغییر شکل در آن‌ها بستگی به سرعت تغییر شکل دارد، یعنی باید در معادله تنش- تغییر شکل عامل زمان را هم دخالت داد. این گونه مواد که تغییر شکل آن‌ها بستگی به زمان دارد مواد ویسکو الاستیک[1] نامیده می‌شوند (۲). اغلب محصولات کشاورزی جزو مواد ویسکوالاستیک می‌باشند یعنی هم دارای خواص مواد الاستیک و هم دارای خواص مواد ویسکوز (لزج) می‌باشند. مطالعه و بررسی مدل‌های ویسکوالاستیک میوه انار بر اساس منحنی استراحت تنش به منظور بررسی و تحلیل رفتار میوه تحت نیروهای وارده به آن می‌تواند در کاهش ضایعات پس از برداشت این میوه صادراتی و استراتژیک مؤثر باشد.

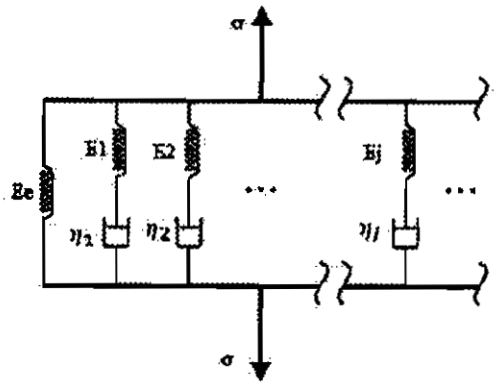
در آزمون استراحت تنش یک کرنش آنی به نمونه داده می‌شود سپس تنش مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن این تغییر شکل به عنوان تابعی از زمان ثبت می‌شود (۳). هنگامی که یک آزمون استراحت تنش انجام می‌گیرد رفتارهای متفاوتی می‌تواند مشاهده شود (٤)؛ رفتار مواد مختلف تحت آزمون استراحت تنش در شکل ۱ بیان شده است.



شکل ۱- منحنی استراحت تنش مواد مختلف

آزمون استراحت تنش یکی از آزمون‌های بسیار مهم برای تعیین ویژگی‌های ویسکو الاستیک مواد بیولوژیکی می‌باشد (٥). برای تفسیر داده‌های استراحت تنش یک ماده ویسکو الاستیک خطی از مدل تعمیم یافته ماکسول بارها استفاده شده است. این مدل شامل n المان ماکسول و یک فنر که به طور موازی با المان‌ها قرار گرفته است و هر المان ماکسول خود شامل دو جزء فنر و کمک فنر می‌باشد که به طور سری قرار گرفته‌اند (٦). در مدل‌های رئولوژیکی جزء فنر نشانگر قانون هوک (رفتار الاستیک ایده آل) و جزء کمک فنر نشانگر قانون ویسکوزیته نیوتن (رفتار ویسکوز ایده آل) می‌باشند که در شکل زیر مدل رئولوژیکی تعمیم یافته ماکسول نشان داده شده است.

1-Viscoelastic



شکل ۲- مدل تعمیم یافته ماکسول با سه المان و یک فنر موازی با المان‌ها

۲) مواد و روش‌ها

۱- مواد

سه رقم انار اردستانی، شیشه کپ و ملس که از باغ‌های شهرستان فردوس و فیض آباد تربت حیدریه جمع آوری شده بودند برای انجام آزمایشات انتخاب شدند.

آزمون استراحت تنش با استفاده از دستگاه آنالیز بافت (Texture analyzer) که دارای نیرو سنجی با دقت ۰/۰۰۱ نیوتن بود انجام گرفت. همه آزمایشات در دمای اتاق انجام شدند.

۲- روش‌ها

الف) آزمون استراحت تنش

نمونه‌ها به وسیله یک پروب با قطر ۱۰۰ میلی متر با سرعت ثابت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه تا ایجاد تغییر شکلی برابر با ۳ میلی‌متر در نمونه فشرده شدند. سپس دستگاه با ثابت نگه داشتن مقدار تغییر شکل ایجاد شده در نمونه نیروی متناظر با آن را به مدت ۶۰ ثانیه ثبت و منحنی مربوط به آن (نیرو - زمان) را رسم نمود. برای تبدیل منحنی نیرو - زمان به منحنی تنش- زمان مقدار نیروی ثبت شده توسط دستگاه بر سطح تماس بین میوه و پروب دستگاه تقسیم گردید و مقدار تنش اعمالی به نمونه به دست آمد.

ب) مدل‌های ریاضی

از دو مدل برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد، یکی مدل تعمیم یافته ماکسول (رابطه ۱) و دیگری مدل پلیج (رابطه ۲) می‌باشد که توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i e^{(-t/\tau_i)} + \sigma_e \qquad (۱)$$

$$\sigma(t) = \frac{A \cdot B \cdot t}{1 + B \cdot t} \qquad (۲)$$

در مدل ماکسول $\sigma(t)$ تنش در زمان t و σ_e تنش باقیمانده (مقدار تنش وقتی که t به سمت بینهایت میل می کند). C_1 و τ_1 ضرایب مدل می باشند که $\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$ زمان استراحت می‌باشد که عبارت از نسبت ویسکوزیته جزء کمک فنر به مدول الاستیسیته جزء فنر می باشد (۷).

برای برازش خوب مدل به داده‌های حاصل از آزمایش معمولاً دو یا سه المان مورد نیاز است (۸). برای برازش مدل به داده‌ها نیز از نرم افزار Slide Write V7.01 استفاده شد.

در مدل پلیج $\sigma(t)$ از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\sigma(t) = \frac{\sigma(0)-\sigma(t)}{\sigma(0)} \qquad (۳)$$

مفهوم پارامتر A در رابطه ۲ بیانگر این می‌باشد که چه میزان کاهش تنش در طول استراحت رخ داده است. اگر پارامتر A برابر با صفر باشد تنش به هیچ وجه به استراحت نرسیده است (یعنی یک جامد الاستیک ایده آل) و اگر برابر با یک باشد میزان تنش سرانجام به صفر میل می‌کند (به طور مثال در مایعات) و اگر بین صفر و یک باشد بیانگر این است که یک تنش باقی‌مانده وجود دارد. پارامتر B حاکی از میزان (شدت) در جایی که تنش به استراحت می‌رسد، در حالی که معکوس آن بیانگر زمان مورد نیاز برای رسیدن به استراحتی برابر با A/2 می‌باشد. اگر مقدار B برابر با صفر باشد تنش به هیچ وجه به استراحت نمی‌رسد (همانند یک جامد الاستیک ایده آل). وقتی که مقدار پارامتر B کم باشد تنش به کندی به استراحت می‌رسد و مقدار زیاد آن بیانگر یک شیب تند در منحنی استراحت تنش می‌باشد (۹).

با ترکیب رابطه ۳ و ۲ می‌توان رابطه کلی مدل پلیج را که در زیر بیان شده است به دست آورد.

$$\frac{\sigma(0)-\sigma(t)}{\sigma(0)} = \frac{A*B*t}{1+B*t} \qquad (٤)$$

در رابطه ٤ $\sigma(0)$ تنش اولیه اعمالی به نمونه میباشد. برای برازش مدل پلیج به منحنی های استراحت تنش ابتدا منحنی ها طبق فرمول سمت چپ رابطه ٤ نرمالیزه شدند و سپس با استفاده از رگرسیون غیرخطی و برازش مدل به منحنی های نرمالیزه شده ضرایب A، B و 1/B محاسبه شدند.

۳) نتایج و بحث

ضرایب به دست آمده از برازش مدل‌های ماکسول و پلیج بر منحنی‌های استراحت تنش به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ بیان شده‌اند. برازش مدل پلیج به منحنی‌های استراحت تنش ضریب تبیین پایین‌تری نسبت به مدل تعمیم یافته ماکسول را دارا می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید هردو پارامتر A و B در اندازه بزرگ واریته اردستانی دارای کم‌ترین مقدار و بیشترین مقدار آن‌ها در اندازه کوچک واریته اردستانی مشاهده می‌شود.

جدول ۱- ثابت‌های مدل پلیج برای سه واریته انار

واریته	اندازه	A	B(1/s)	R^2
اردستانی	بزرگ	۰/۲۹۸	۰/۱۸۸	۰/۹۷۲
	متوسط	۰/۳۱۸	۰/۲۷۳	۰/۹۶۳
	کوچک	۰/۳٤۱	۰/٤۱۰	۰/۹۵۷
شیشه کپ	بزرگ	۰/۳۲٦	۰/۳۰۲	۰/۹٦۵
	متوسط	۰/۳۰۷	۰/۲٦٤	۰/۹۷۱
	کوچک	۰/۳۱۷	۰/۲۳۸	۰/۹٦۹
ملس	بزرگ	۰/۳۲۱	۰/۲۷٤	۰/۹۵٦
	متوسط	۰/۳۰٦	۰/۲۳۱	۰/۹۵٦
	کوچک	۰/۳۲۱	۰/۲۳۲	۰/۹٦۰

مقادیر موجود در جدول ۲ بیانگر این می‌باشد که همه واریته‌ها به طور متوسط درصد کاهش تنشی برابر با ۳۲٪ را نسبت به تنش اولیه دارا می‌باشند. مقدار تنش اولیه (تنش در زمان صفر) به عنوان معیاری از مقاومت میوه در برابر تنش اعمالی به آن می‌باشد و همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود واریته ملس دارای کم‌ترین مقدار تنش اولیه می‌باشد در حالی که واریته شیشه کپ دارای بیشترین مقدار و به طبع آن دارای مقاومت بیشتری در برابر نیروها و تنش‌های اعمالی به آن را دارا می‌باشد. مقدار تنش باقی‌مانده نیز که به عنوان معیاری برای جامدیت (الاستیک بودن) ماده مطرح می‌باشد در واریته شیشه کپ نسبت به دو واریته دیگر بیشتر می‌باشد، علاوه بر آن مقادیر ضرایب C_i که نشان دهنده جزء الاستیک مدل می‌باشد در واریته شیشه کپ مقدار بیشتری را دارا هستند؛ همچنین بیشترین زمان استراحت نیز متعلق به واریته شیشه کپ و کم‌ترین آن مربوط به واریته اردستانی می‌باشد.

از آنجا مدل ماکسول نسبت به مدل پلیج رفتار میوه را تحت آزمون استراحت تنش توصیف بهتری ارائه کرده است مبنای نتیجه گیری نهایی خود را بر اساس این مدل بیان می‌کنیم.

نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهد که واریته شیشه کپ نسبت به دو واریته دیگر در برابر آسیب‌های مکانیکی وارد به آن دارای مقاومت بیشتری می‌باشد و طبیعی است که در هنگام برداشت، حمل و نقل و انبارداری داری ضایعات کمتری می‌باشد و واریته ای مناسب برای صادر نمودن این محصول استراتژیک خواهد بود. از سوی دیگر برای کمتر نمودن ضایعات مربوط به دو واریته اردستانی و ملس باید احتیاط‌های لازم را هنگام فرآیندهای برداشت و پس از برداشت این میوه اتخاذ نمود.

جدول ۲- ثابت‌های مدل تعمیم یافته ماکسول برای سه واریته انار

واریته	اندازه	$\sigma(0)$	$\sigma_e(MPa)$	$C_1(MPa)$	$C_2(MPa)$	$C_3(MPa)$				R^2
اردستانی	بزرگ	۰/۱۰۲	۰/۰۷۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۱/۸۳۵	۲۳/۵۹٤	۲۳/۲۱۲	۰/۹۹۸
	متوسط	۰/۱۰۷	۰/۰۷۵	۰/۰۱٦	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۱/٦٥۹	۲۰/۳۷۹	۲٦/٥۳٦	۰/۹۷٥
	کوچک	۰/۱۳٦	۰/۰۸۳	۰/۰۲٤	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۱/۷٤٦	۳۳/٥٥۸	۲٦/٥٤۹	۰/۹۸۷
شیشه کپ	بزرگ	۰/۱۲٥	۰/۰۸۰	۰/۰۲۲	۰/۰۱٦	۰/۰۰۷	۱/۷۳۲	٥۹/٦۰٥	۱۱/٦۷۸	۰/۹۹۷
	متوسط	۰/۱۳۷	۰/۰۹۱	۰/۰۲۲	۰/۰۱٦	۰/۰۰۸	۲/۱۲۳	٦۱/۷۱۰	۱٦/٤۲٤	۰/۹۹۸
	کوچک	۰/۲۰٥	۰/۱٤۰	۰/۰۳٤	۰/۰۱۷	۰/۰۱٥	۲/۲٦۷	۳۱/۱٦٥	۳٤/۲٤٦	۰/۹۹۸
ملس	بزرگ	۰/۰۸٤	۰/۰٥۷	۰/۰۱٤	۰/۰۰٦	۰/۰۰۷	۱/۸٤٦	۲۸/۹۰٤	۳۰/۹۳۸	۰/۹۹٦
	متوسط	۰/۰٥۷	۰/۰۳۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰٥	۰/۰۰٥	۲/۰٦٦	۳٤/٦٦۸	۳۳/۷۸۳	۰/۹۹٤
	کوچک	۰/۱۱۱	۰/۰۷٥	۰/۰۱۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۲/۰۲۲	۳۱/۰۱۳	۳۱/۹۷۰	۰/۹۹۹

منابع

1. Bargale, P., J. Irudayaraj, and B. Marquis, Some mechanical properties and stress relaxation characteristics of lentils. Canadian Agricultural Engineering, 1994. 36(4): p. 247-254.
2. Sitkel, G., Mechanics of agricultural materials. 1986.
3. Hassan, B., A. Alhamdan, and A. Elansari, Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. Journal of Food Engineering, 2005. 66(4): p. 439-445.
4. Steffe, J.F., Rheological methods in food process engineering. 1996: Freeman Press.
5. Cenkowski, S., et al., Effect of maturity stage on mechanical properties of canola seeds.
6. Bock, R., V. Puri, and H. Manbeck, Modeling stress relaxation response of wheat en masse using the triaxial test. Trans of ASAE, 1989. 35(5): p. 1701-1708.
7. Martínez-Monzó, J., et al., Changes on Viscoelastic Properties of Apple (Granny Smith) due to Vacuum Impregnation. Process Optimisation and Minimal Processing of Foods: p. 101.
8. Peleg, M. and N. Pollak, THE PROBLEM OF EQUILIBRIUM CONDITIONS IN STRESS RELAXATION ANALYSES OF SOLID FOODS1. Journal of Texture Studies, 1982. 13(1): p. 1-11.
9. Peleg, M., Characterization of the stress relaxation curves of solid foods. Journal of Food science, 1979. 44(1): p. 277-281.

Abstract

The study of biomechanical properties of fruits can have a great impact on the reduction of the damages which often appear in fruit harvest, post-harvest and also when they are transported. In this study, the biomechanical properties of three varieties of pomegranate fruit (Ardestani, Sishekap and Malas) in three sizes of small, medium and large which are grown in Khorasan Razavi province were studied. Biomechanical properties of fruit such as compressive strength, skin's resistance to penetration of fruit and the fruit behavior under compressive stress applied to it in a constant deformation and a constant time of 60 seconds were evaluated. Then the popular models of Maxwell and Peleg fitted on the data obtained from stress relaxation test and the coefficients of models were calculated.

Using the calculated coefficients, the variety and size that had the minimal mechanical damages and wastes in the processes of fruit harvesting and post harvesting is determined. The results show that the Sishekap variety damaged less than the other varieties. It in turn, cause to less harvesting and post-harvesting waste in compared to the other studied varieties.

Keyword: harvest and post-harvest waste pomegranate, biomechanical properties, stress relaxation, Maxwell model, model peleg